

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**НЕШТА АННА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 621.993.025.1-52-53(043.3)

**ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ РІЗЕЙ  
МЕТОДОМ БЕЗЦЕНТРОЇДНОГО ОГИНАННЯ**

**05.02.08 – технологія машинобудування**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Київ – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Криворучко Дмитро Володимирович,**  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри технології  
машинобудування, верстатів та інструментів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Пасічник Віталій Анатолійович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри інтегрованих технологій  
машинобудування

доктор технічних наук, професор  
**Пермяков Олександр Анатолійович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри технології машинобудування та  
металорізальних верстатів

Захист відбудеться “ 19 ” березня 2019 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. № 1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “18” лютого 2019 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
канд. техн. наук, доцент



О.С. Ганпанцурова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Важливим чинником конкурентоспроможності виробництва є продуктивність оброблення на всіх операціях технологічного процесу. В сучасних умовах майже завжди підвищення продуктивності на операціях механічного оброблення призводить до зниження собівартості. В Україні декілька підприємств виготовляють деталі та запасні частини до бурового обладнання. Сумарний річний обсяг виготовлення деталей бурової коронки складає близько 10000 шт., що при заявлених вимогах до якості та результируючих показниках трудомісткості відповідає середній серійності виробництва.

В процесах виготовлення відповідальних деталей бурового обладнання значну трудомісткість мають операції виготовлення внутрішніх різей, які забезпечують передачу крутного моменту від приводу установки до бурової коронки в умовах підвищеного зношування та знакозмінних навантажень і часто мають спеціальний профіль. Поширеними є круглі різі з кроком 12,7 мм та висотою профілю 1,5 мм для діапазону діаметрів 28÷64 мм. Для їх оброблення використовують способи нарізання різей профільним та непрофільним різцями. Недоліками способу оброблення профільним різцем є високі витрати на різальні пластини та зменшення швидкості різання через ускладнені умови оброблення, що в сукупності негативно впливає на собівартість. Недоліком способу оброблення непрофільним різцем є необхідність реалізації багатопрхідного циклу оброблення, що суттєво знижує продуктивність оброблення. Також негативним моментом процесу є суттєва зміна умов оброблення в процесі його реалізації, що призводить до появи вібрацій та зменшує період стійкості різальних інструментів, який стає чутливим чинником ефективності. Широке розповсюдження на виробництві верстатів з ЧПК наразі дозволяє реалізовувати нові схеми оброблення складних поверхонь за рахунок складних кінематичних рухів, що забезпечують параметри точності, проте не збільшують витрати на реалізацію. Саме пошук схем оброблення внутрішніх різей зі спеціальним профілем простим та надійним інструментом у поєднанні зі складною траєкторією, що в сукупності забезпечує можливість інтенсифікації режиму різання та забезпечує потрібну якість, є актуальною науково-практичною задачею технології машинобудування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету у рамках завдання фундаментальних держбюджетних НДР МОН України: «Підвищення вібростійкості процесів фрезерування та точіння складнопрофільних деталей із важкооброблюваних матеріалів на основі управління та оптимізації геометрії різальної частини інструментів» (ДР № 0113U0001366), «Комплексна розробка методів підвищення ефективності обробки важкооброблюваних матеріалів за рахунок удосконалення ріжучих інструментів та умов їх застосування» (ДР № 0115U000663), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення продуктивності оброблення внутрішніх різей спеціального профілю із застосуванням методу безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК.

Для досягнення сформульованої мети необхідно було вирішити наступні задачі дисертаційного дослідження:

- визначити технологічні можливості оброблення внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на верстатах з ЧПК, його місце серед альтернативних методів оброблення та визначити конструкторсько-технологічні обмеження його застосування за умови забезпечення необхідної якості та точності;
- дослідити особливості технологічних параметрів оброблення внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на верстатах з ЧПК та обмеження формоутворення поверхонь внутрішніх різей;
- розробити математичну модель процесу силової взаємодії в технологічній системі при обробленні методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК, яка враховує траєкторії руху інструмента та кількість різальних елементів;
- виявити області можливого з позиції забезпечення точності застосування технології оброблення внутрішніх різей непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК для метричної, дюймової, трапецеїдальної, упорної та круглої різей;
- визначити залежності діаметрів непрофільного інструмента і траєкторії його руху від параметрів різі при обробленні методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК;
- провести теоретичні дослідження з оптимізації режиму різання процесу оброблення внутрішніх різей непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК з умови максимуму продуктивності;
- в лабораторних та виробничих умовах провести комп'ютерну симуляцію та експериментальні дослідження працездатності запропонованого методу, визначити параметри стійкості інструменту та умов забезпечення точності, а також, визначити межі економічної ефективності. Довести високу продуктивність та технологічну надійність запропонованої технології та способу. Розробити рекомендації щодо його практичної реалізації.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес оброблення внутрішніх різьових поверхонь.

*Предмет дослідження* – технологічні параметри, показники продуктивності та якості оброблення внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК.

**Методи дослідження.** Результати роботи базуються на теоретичних положеннях технології машинобудування, теорії різання, теорії проектування різальних інструментів, програмуванні на верстатах з ЧПК. Аналітичні дослідження із визначення області застосування методу безцентроїдного огинання при обробленні внутрішніх різей виконано на основі геометричного моделювання із застосуванням положень теорії взаємозамінності. Планування модельних та натурних експериментів і обробку їх результатів виконано на основі теорії багатofакторного експерименту. Визначення параметрів оброблення різей конкретного типорозміру базуються на математичній статистиці та застосуванні методу найменших квадратів. Визначення власних частот коливань різального інструмента здійснюється шляхом модального аналізу відповідно з використанням методу скінчених елементів. Реалізацію

чисельних моделей виконано з використанням ліцензійного програмного забезпечення. Достовірність теоретичних розробок підтверджено результатами експериментальних досліджень, проведених у лабораторних та виробничих умовах.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі теоретично обґрунтовані технологічні параметри нового способу нарізання внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК, а комплексні теоретико-експериментальні дослідження технологічного процесу в сукупності з розробленими конструкціями різальних інструментів забезпечили підвищення продуктивності та зменшення трудомісткості механічного оброблення внутрішніх різей.

При цьому:

1) вперше розроблена математична модель процесу силової взаємодії при обробленні внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК з урахуванням траєкторії руху інструмента і кількості різальних елементів, що дозволило обґрунтувати вимоги для інструментального забезпечення та параметрів технологічного процесу оброблення з умови оброблення із заданою точністю;

2) вперше встановлені залежності діаметрів непрофільного інструменту та траєкторії його руху від параметрів різі при обробленні методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК, а також визначені межі застосування технології оброблення внутрішніх різей спеціального профілю непрофільним інструментом;

3) вперше визначено фактори, обмеження і цільову функцію оптимізації режиму різання при обробленні внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК, що дозволило визначити оптимальні режими різання з умови максимуму продуктивності.

**Практичне значення одержаних результатів.**

1. Визначена область застосування запропонованого способу для оброблення внутрішніх різей: метричної з кроком  $p=2\div3,5$  мм та діаметрами  $D=16\div64$  мм, дюймової – з усіма типорозмірами кроків та діаметрами  $G3/8\div G3$ ", круглої – з кроком  $p=12,7$  мм та діаметрами  $R22\div64$  мм.

2. Розроблена інженерна методика для визначення діаметру непрофільного інструмента та траєкторії його руху в залежності від параметрів оброблюваної різі методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК.

3. Проведені у лабораторних та виробничих умовах комп'ютерна симуляція та експериментальні дослідження працездатності запропонованого методу дозволили визначити параметри стійкості інструменту та умов забезпечення точності, а також прогнозувати величину економічної ефективності.

4. Розроблено конструкторську та технологічну документацію для виготовлення непрофільного різального інструмента, визначені параметри траєкторії та умови його руху для оброблення круглих, метричних та дюймових різей.

5. Впровадження запропонованого способу та технологічних рекомендацій на НВП «Насостехкомплект» (м. Суми) при виготовленні деталей корпусу бурової коронки з круглою різзю R32 та муфти з'єднувальної з метричною різзю M48x3

дозволило підвищити продуктивність оброблення в 9 разів та 4 рази відповідно у порівнянні із нарізанням різьовим різцем.

Основні результати роботи впроваджено у навчальний процес підготовки студентів Сумського державного університету за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр» при підготовці курсів «Теорія різання», «Експериментальні методи дослідження технологічних процесів», а також при підготовці науково-дослідних робіт і кваліфікаційних робіт студентів.

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. В індивідуальних публікаціях і роботах, підготовлених у співавторстві, викладені наступні наукові результати, що належать автору: виявлено області можливого застосування технології оброблення внутрішніх різей непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК, виконано обґрунтування планів і програм експериментів, розроблена математична модель процесу силової взаємодії в технологічній системі при обробленні різей методом безцентроїдного огинання. Також виконано оптимізацію режимів оброблення для внутрішніх різей, проведені аналітичні та експериментальні дослідження процесу оброблення внутрішніх різей методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК, здійснено впровадження запропонованої технології у виробничий процес. Здобувачем виконано модальний аналіз конструкцій непрофільних інструментів, розроблена конструкторська документація та виготовлені дослідні зразки інструментів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення та результати роботи доповідалися на: II–VI Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012–2016 рр.); XIV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука – виробництво» (м. Суми, 2014 р.); Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии и процессы» (м. Курськ, 2014 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Одеса, 2015 р.); XVI Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Суми, 2016 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано у 9 наукових працях, з яких 4 статті у наукових фахових виданнях України (у т.ч. 1 стаття у виданні, що входить до наукометричних баз), 1 патент України на винахід, 3 публікації у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 162 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 159 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 18 таблицями та 82 рисунками. Список використаних джерел містить 123 найменування, з них 91 кирилицею та 32 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи для галузі машинобудування, наведені відомості про апробацію результатів, публікації та структуру роботи.

У **першому** розділі виконано систематизацію інформації науково-технічних джерел інформації у галузі оброблення внутрішніх різьових поверхонь, можливостей сучасного металорізального обладнання, інтенсифікації виробництва, тенденцій розвитку машинобудівної галузі та проектування різальних інструментів.

Дослідженням технологій оброблення різьових поверхонь та їх вдосконаленням займалися відомі вчені: А.І. Грабченко, В.М.В. Hanson, S.W. Lee, С.А. Dies, М.Ф. Семко, Є.В. Глушко та В.В. Лоцманенко. Наукові праці М.Я. Левицького, С.І. Брусова, С.О. Маркіна, В.М. Воронова, О.В. Малькова, L. Berglind присвячені розробленню нових способів обробки різей та підвищенню ефективності відомих.

За результатами їх досліджень встановлено, що процес механічного оброблення внутрішніх різей є більш трудомістким, ніж зовнішніх. Визначено, що оброблення внутрішніх різей методом копіювання характеризується великою довжиною контакту різальної кромки та заготовки, що спричиняє утруднені умови різання внаслідок суттєвого збільшення пружних деформацій технологічної системи. Результатом цього стає підвищене зношування різального інструмента та зниження точності та якості оброблених різей.

В наявних дослідженнях недостатньо уваги приділено можливостям сучасних верстатів з ЧПК та, як наслідок, відсутня систематизація профілів різей, що можливо обробити непрофільним інструментом методом безцентроїдного огинання при реалізації його кінематики на фрезерних верстатах з ЧПК. Також не досліджено застосування непрофільного багатолезового інструмента.

Тому існує необхідність розроблення технології оброблення внутрішніх різей, що дозволяє забезпечити показники точності та якості різьових поверхонь, при високій продуктивності за рахунок застосування метода безцентроїдного огинання з використанням непрофільного інструмента на фрезерних верстатах з ЧПК і, як результат, дозволить зменшити собівартість оброблення.

Аналіз конструкторсько-технологічних характеристик профілів різей дозволив їх систематизувати та виявити можливі варіанти реалізації технології оброблення непрофільним інструментом методом безцентроїдного огинання з урахуванням кінематичних можливостей фрезерних верстатів з ЧПК. Проведений аналіз дозволив визначити типи різей, для яких можливе застосування технології оброблення непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК, а саме: однозахідні внутрішні циліндричні різі, симетричного профілю із радіусною формою западини, за формою профілю: трикутні, круглові та комбіновані, середньої та низької точності.

На основі аналізу технологічних параметрів: точності, шорсткості, продуктивності для оброблення різних типів різей сформульована робоча гіпотеза про перспективи методу безцентроїдного огинання у порівнянні з найбільш поширеними методами, а саме оброблення внутрішніх різей профільними різцями та різьовими

фрезами та з методом багатопрохідного точіння непрофільним інструментом, які характеризуються невисокою продуктивністю.

Сформульована мета, основні задачі дисертаційного дослідження та напрямки їх вирішення, що відображено у структурно-логічній схемі дослідження.

У **другому розділі** визначено області застосування способу оброблення різних типорозмірів внутрішніх різей, що заснований на методі безцентроїдного огинання. Представлені технологічні особливості застосування технології оброблення внутрішніх різей з великою довжиною профілю і вимоги до непрофільного різального інструмента.

Технологія оброблення реалізована шляхом безцентроїдного огинання вершинами інструмента профілю оброблюваної різі в заготовці з попередньо обробленим отвором. Початковими даними для проектування операції є параметри профілю різі, її глибина, геометричні параметри заготовки. Зазначимо, що номінальний діаметр попередньо обробленого отвору в заготовці повинен дорівнювати мінімальному значенню внутрішнього діаметра різі із запасом не менше похибки оброблення отвору в заготовці.

Для випадку оброблення круглорізної різі схема передбачає попередню установку і закріплення заготовки на столі верстату, зміщення осі обертання інструмента відносно осі попередньо обробленого у заготовці отвору на величину  $h_p$ , де  $h_p$  – відповідає висоті профілю різі.

Схема безцентроїдного огинання (патент України на винахід № 103734) реалізується сукупністю таких узгоджених рухів (рис. 1): головний рух – обертання різального інструмента  $n_i$  (об/хв), рух осьової подачі інструмента  $s_i$  (мм/хв), рух кругової подачі заготовки навколо осі інструмента  $s_z$  (мм/хв), причому два останні рухи повинні бути узгодженими згідно з рівнянням –  $s_i = s_z \cdot p / (2\pi \cdot h_p)$ , де  $p$  – крок різі (мм). Схема утворення мікронерівностей на різних ділянках оброблюваної поверхні показана на рис. 2. Збільшення кількості різальних кромок на діаметрі та збільшення частоти обертання шпинделя призводить до зменшення висоти мікронерівностей. При цьому результуюча подача на зуб  $s_z$  визначається рівнянням –  $s_z = s_i / (n_i \cdot n_{re})$ , де  $n_{re}$  – кількість різальних пластин з кутом при вершині  $\varepsilon$ .

Згідно даного способу параметри гвинтової траєкторії однозначно визначаються параметрами профілю різі, адже процес зняття припуску із западин профілю відбувається шляхом поступового огинання вершиною леза профілю оброблюваної різі з глибиною різання, що змінюється від мінімального значення  $t_{min}$  на вершинах профілю до максимального  $t_{max}$  у западинах різі (рис. 2). При цьому під час огинання також змінюється активна довжина різальної кромки, що контактує з припуском.

Реалізація запропонованої схеми можлива на фрезерних верстатах з ЧПК, що мають високу точність переміщень робочих органів, достатню жорсткість для виконання оброблення з високими частотами обертання і подачами, достатню потужність та універсальність при переналагодженні.

Використання змінних непереточуваних пластин для різних типів різей обмежується можливістю огинання профілю оброблюваної поверхні вершиною пластини без пошкодження боковими поверхнями пластини оброблюваної поверхні різі.



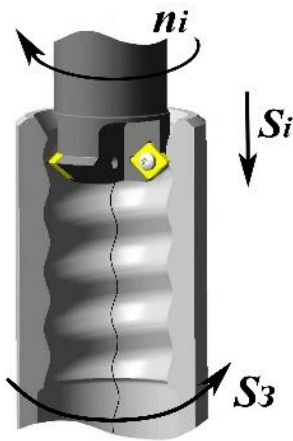


Рис. 1 – Схема рухів процесу безцентроїдного огинання

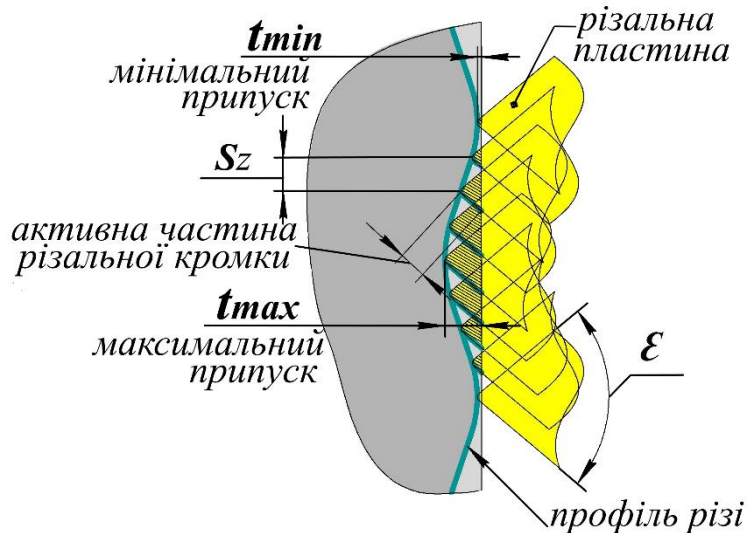


Рис. 2 – Схема огинання профілю різи вершинами інструмента та утворення мікронерівностей

Тому обмеженнями при обробленні профілю різей будуть:

- радіус при вершині пластини  $r_e$  повинен бути меншим за радіус  $R$  западини різи;
- кут при вершині  $\varepsilon$  повинен бути меншим за кут профілю різи  $\alpha$  (рис. 3).

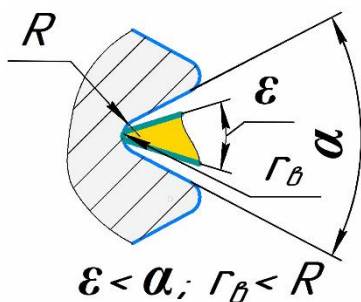


Рис. 3 – Умова оброблення різей не-профільним інструментом

Основним результатом другого розділу стало теоретичне обґрунтування нового способу оброблення внутрішніх різей, для якого визначена умова огинання різальними елементами непрофільного інструмента профілю різи, що дозволяє провести подальше проектування інструментального і технологічного забезпечення. Враховуючи суттєву нестаціонарність процесу далі слід дослідити процес силової взаємодії елементів в технологічній системі та визначити оптимальні режими різання задля забезпечення найвищої продуктивності.

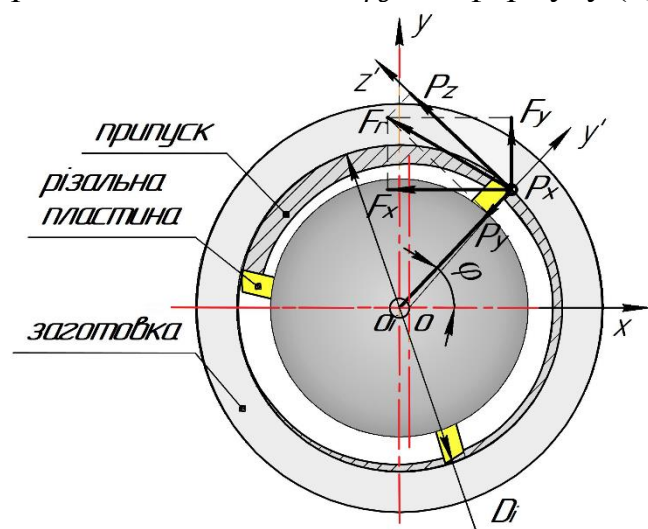
У третьому розділі проведено аналіз схеми силової взаємодії непрофільного різального інструмента із заготовкою. Сила різання  $Fr$  та її проекції  $F_x$ ,  $F_y$  у системі координат верстата, що діють на інструмент в цілому, розраховувалися на основі принципу суперпозиції сил різання, що діють на окремі різальні елементи (1). Проекції цих сил різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  в основній системі координат інструменту розраховувалися за емпіричними залежностями для процесу повздовжнього точіння з врахуванням геометрії різальної частини інструменту:

$$P_{x,y,z} = C_{P_{x,y,z}} \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^m \cdot K_p \quad (2)$$

де  $C_{P_{x,y,z}}$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $m$ ,  $K_p$  – коефіцієнти та показники ступеня цієї залежності, що визначалися за довідником для заданого матеріалу заготовки та інших умов.

Проекції  $F_x$ ,  $F_y$  для інструменту з одним різальним елементом відповідно до схеми силової взаємодії непрофільного різального інструмента та заготовки (рис. 4)

визначаються залежністю (3). Її узагальнення на різальний інструмент з числом різальних елементів  $n_{re}$  дає формулу (4).



$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_x = P_z \sin \varphi - P_y \cos \varphi \\ F_y = P_z \cos \varphi - P_y \sin \varphi \end{cases} \quad (3)$$

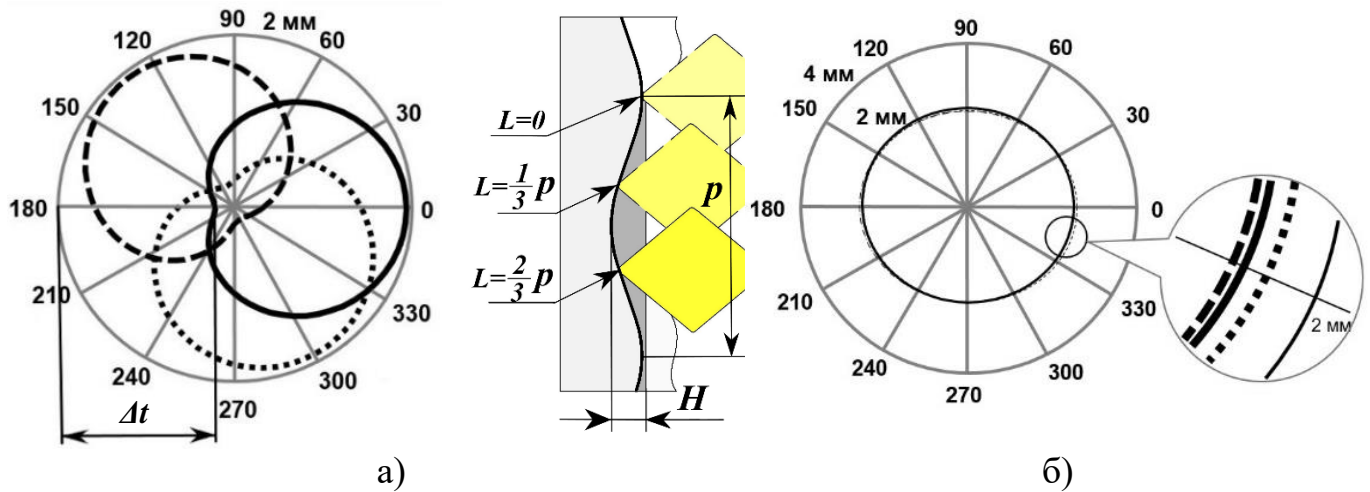
$$\begin{cases} F_x^{n_{re}}(\varphi) = \sum_{i=1}^{n_{re}} F_x \left( \varphi + \frac{2\pi}{n_{re}}(i-1) \right) \\ F_y^{n_{re}}(\varphi) = \sum_{i=1}^{n_{re}} F_y \left( \varphi + \frac{2\pi}{n_{re}}(i-1) \right) \end{cases} \quad (4)$$

Рис. 4 – Схема силової взаємодії непрофільного різального інструмента та заготовки

Розрахунки проводилися у середовищі MATLAB. Для розрахунків були прийняті такі умови: оброблюваний матеріал – сталь, твердість HB 220. Геометрія різального інструменту:  $\varphi = 50^\circ$ . Коефіцієнти емпіричної моделі сили різання (1):  $C_{Pz} = 300$ ,  $x = 1,0$ ;  $y = 0,75$ ,  $m = 0,2$ ,  $K_{Pz} = 0,957$ . Діаметр інструмента 30 мм, висота профілю  $H=1,5$  мм. В дослідженні кількість різальних елементів змінювалася від  $n_{re}=1$  до  $n_{re}=5$ .

Розрахунки показали, що миттєва глибина різання  $t$  та відповідна їй миттєва площа поперечного перетину зрізуваного шару змінюється. Так з (рис. 5 а) видно, що зміна глибини різання  $\Delta t$  для інструмента з  $n_{re}=1$  дорівнює висоті профілю  $H$ . Разом з тим вже при  $n_{re}=2$  (рис. 5 б) зміна сумарної глибини різання  $\Delta t$  зменшується до 0,1 мм та зменшується ще більше зі збільшенням кількості різальних елементів  $n_{re}$ . Таку ж тенденцію має і зміна сили різання  $\Delta Fr$  впродовж одного оберту інструменту.

Разом з тим виявлено, що вплив кількості різальних елементів  $n_{re}$  на силу різання  $Fr$  носить екстремальний характер з екстремумом при  $n_{re}=3$  (рис. 6). Вдовж одного кроку різі  $p$  (розглянуті 3 довільні точки положення різального елемента:  $L=0$ ;  $L = \frac{1}{3}p$  та  $L = \frac{2}{3}p$ ) фаза максимальної глибини різання та максимальної сили різання змінюється, але зі збільшенням кількості зубів зміна максимальної сили різання при переміщенні інструмента на один крок різі зменшується екстремально з мінімумом при  $n_{re}=4$  (рис. 6). Відповідно до цього, при  $n_{re}=3$  забезпечується мінімізація сили різання  $Fr$ , а при  $n_{re}=4$  – максимальне вирівнювання навантаження на різальні елементи. Враховуючи те, що зміна сили різання  $\Delta Fr$  впродовж одного оберту інструмента є джерелом вимушених коливань в технологічній системі та незначну величину зміну максимальної сили різання  $\Delta Fr_{max}$ , за оптимальну кількість різальних елементів прийнято  $n_{re}=3$ .



а) б)  
 .....  $L=0$ , —  $L=1/3$  кроку  $p$  різі, - - -  $L=2/3$  кроку  $p$  різі

Рис. 5 – Зміна миттєвого сумарного значення глибини різання за один оберт різального інструмента у трьох різних точках положення  $L$  різального елемента:

а)  $n_{re}=1$ , б)  $n_{re}=2$

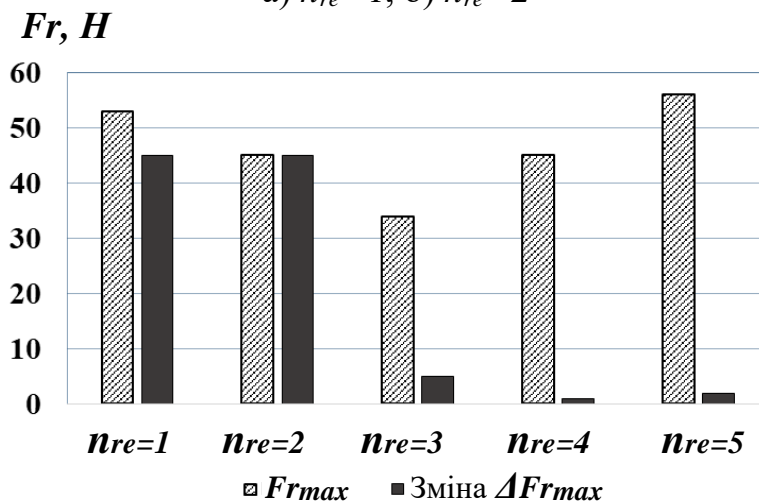


Рис. 6 – Вплив кількості різальних елементів  $n_{re}$  на максимальну силу  $Fr_{max}$  та зміну максимальної сили  $\Delta Fr_{max}$  у межах одного кроку різі

Також у розділі визначена область застосування непрофільного інструмента, його параметри та радіус гвинтової траєкторії руху. Зважаючи на те, що будь-яка різь представляє собою гвинтову поверхню з кутом підйому гвинтової лінії, у поперечному перерізі профіль є замкненим контуром, що складається із сукупності дуг та кривих високих порядків. Для різей трикутного профілю дугами постійного радіусу (рис. 7 а) є виступи та западини, а для круглих різей профілем є суцільне коло. Для досягнення параметрів точності різі необхідно, щоб діаметр непрофільного інструмента  $D_i$  (рис. 7 б) був максимально наближеним до дійсного контуру профілю різі у поперечному перерізі. Тому для виявлення області можливого застосування технології оброблення внутрішніх різей методом огинання непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК побудовані 3D-моделі внутрішніх різей (метрична, дюймова, трапецеїдальна, упорна, кругла) відповідно до розмірів згідно зі стандартами та отримані профілі різей у поперечному перерізі (рис. 7 а).

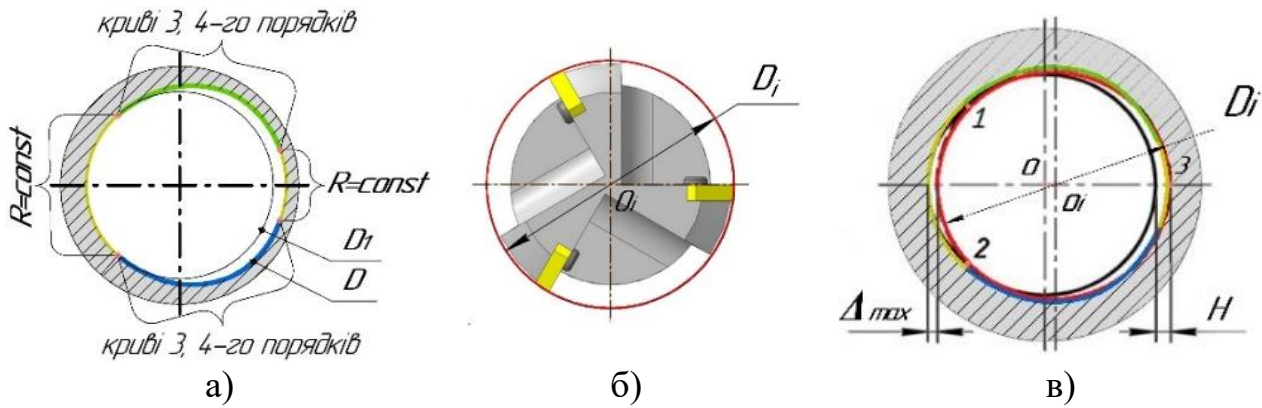


Рис. 7 – Визначення похибки апроксимації дійсного профілю різі у поперечному перерізі та кола по вершинам різального інструмента

За допомогою геометричного моделювання здійснено апроксимацію дійсного профілю різі у поперечному перерізі та кола по вершинам різального інструмента по базових точках 1, 2, 3 (рис. 7 в).

Максимальне відхилення між дійсним профілем різі та діаметром інструмента  $D_i$  є відхилення  $\Delta_{max}$ , що є основним критерієм впливу на точність виготовлення різі. Обробка різі можлива, якщо максимальне відхилення  $\Delta_{max}$  менше допуску середнього діаметра різі згідно відповідного стандарту, тобто:

$$\Delta_{max} < T_{D2} \quad (5)$$

Якщо умова (5) не виконується, то даний спосіб обробки для конкретної різі неприйнятний.

Для виявлення області можливого застосування технології оброблення внутрішніх різей непрофільним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК були розглянуті метрична, кругла (рис. 8), дюймова, трапецеїдальна, упорна різі.

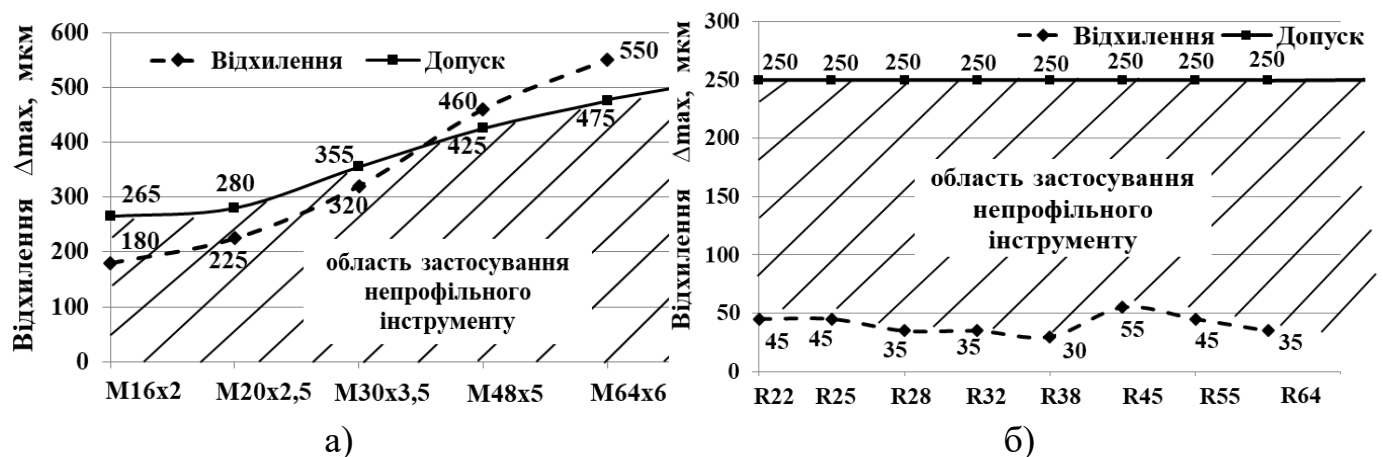


Рис. 8 – Область застосування технології оброблення непрофільним інструментом для внутрішніх різей: а) метричної; б) круглої

Визначена область застосування технології оброблення методом огинання непрофільним інструментом для метричної – в діапазоні кроків  $p=2\div3,5$  мм та діаметрами  $D=16\div64$  мм, трапецеїдальної  $p=2$  мм та діаметрами  $D=16\div28$  мм, дюймової – з усіма типорозмірами кроків та діаметрами  $G3/8\div G3''$  та круглої – з кроком  $p=12,7$  мм та діаметрами  $R22\div64$  мм. Упорна різь не може бути оброблена



вищевказаним способом. Діаметральний діапазон оброблюваних різей обмежується лише конструктивними розмірами інструмента.

Для визначення номінального діаметра непрофільного інструмента і радіуса траєкторії його руху визначені залежності цих параметрів від оброблюваної різі.

Для визначення залежності діаметрів непрофільного інструменту від параметрів різі розглянуто процес оброблення різі у поперечному перерізі непрофільним інструментом (рис. 9 а). Інструмент обертається навколо своєї осі в центрі  $O_i$  системи координат  $X_i Y_i$  з частотою обертання  $n_i$ . Із заготовкою з центром  $O$  зв'язана система координат  $XY$ . Заготовка здійснює обертання з частотою  $n_z$  відносно центру  $O_i$  по колу радіусом  $r$ . Розглянемо взаємне розташування систем координат заготовки та інструмента радіусом  $R_i$  у момент співпадиння координатних осей  $X$  та  $X_i$  при цьому вершина інструмента контактує із заготовкою у точці  $A$  з координатами  $(x; y)$  (рис. 9 б). Відстань від центру  $O$  до точок контуру профілю поперечного перерізу різі дорівнює радіусу  $R_k$ , величина якого змінюється в процесі руху формоутворюючої точки  $A$  та визначена шляхом геометричного моделювання з кутовим кроком  $\varphi_i = 10^\circ$  при  $i \in [1; 36]$ . Всього було отримано 36 різних значень радіуса  $R_k$ , що дозволяє з достатньою точністю провести розрахунки.

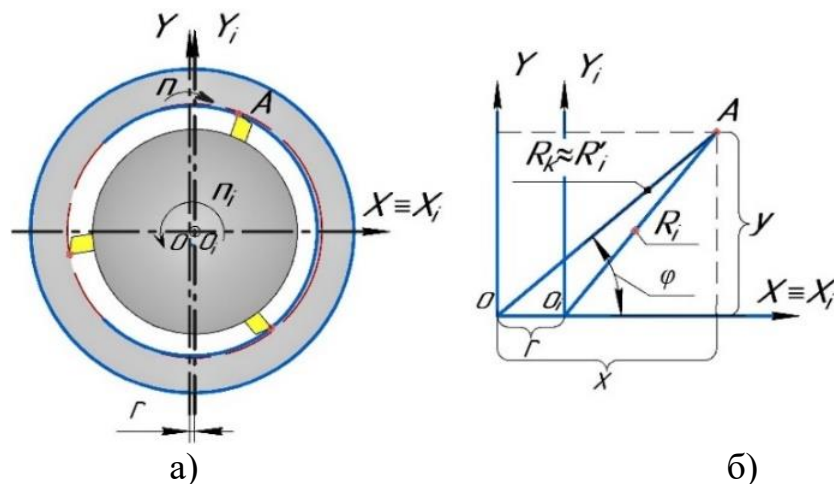


Рис. 9 – Визначення радіуса непрофільного інструмента і радіуса траєкторії його руху: а) схема оброблення різі в поперечному перерізі; б) схематичне зображення систем координат заготовки та інструмента у довільний момент часу.

Так як профілі поперечного перерізу різі і різального інструмента не співпадають, то для обробки різі в межах поля допуску визначається радіус  $R_i$  непрофільного інструмента і радіус  $r$  його гвинтової траєкторії, при яких сума квадратів розбіжностей їх профілів в точках профілю різі буде мінімальною:

$$\sum_{i=1}^{36} (R'_i(\varphi_i, R_i, r) - R_k(\varphi))^2 \rightarrow \min; \quad (6)$$

де  $R'_i$  – радіус від центру різі до точок контуру поперечного перерізу різі, що враховує параметри відносного руху інструмента в системі отвору різі;

$\varphi_i$  – кутовий крок формоутворюючої точки різі при  $i \in [1; 36]$ ;

$R_i$  – радіус непрофільного інструмента в системі координат інструмента, зміщений на величину  $r$  щодо центру поперечного перерізу різі, мм;

$r$  – радіус гвинтової траєкторії непрофільного інструмента, мм.

$R_k$  – радіус від центру різі до точок контуру профілю поперечного перерізу.

Для мінімізації похибки розрахунків радіуса інструмента  $R_i$  необхідно серед множини значень радіусів  $R'_i$ , що контактують з профілем різі у розглянутих 36-ти точках знайти найбільш наближене значення  $R_i$ , при якому формоутворююча точка  $A$  з урахуванням радіуса гвинтової траєкторії  $r$  буде максимально наближатися до точок контуру профілю поперечного перерізу різі  $R_k$ .

Діаметр  $D_i$  різального інструмента та радіуса  $r$  гвинтової траєкторії його руху з використанням умови (6) визначаються з рівнянь регресії, що пов'язують параметри різі з параметрами різального інструмента. Коефіцієнти регресії отримані методом найменших квадратів.

Отримані значення діаметру  $D_i$  різального інструмента та радіуса  $r$  гвинтової траєкторії непрофільного інструмента для оброблення різних типів різі зведені в таблиці 1.

**Табл. 1 – Залежності параметрів непрофільного інструмента від параметрів різі**

Тип різі	Діаметр $D_i$ непрофільного інструмента	Радіус $r$ гвинтової траєкторії руху непрофільного інструмента
метрична	$D_i = D_l + 0,548p + 0,0489$	$r = 0,277p + 0,0489$
дюймова	$D_i = D_l + 0,657p$	$r = 0,328p$
кругла	$D_i = D_l + H_l$	$r = (H_l + T_H)/2$

Встановлено, що похибка розрахунку діаметра непрофільного інструмента та радіуса його гвинтової траєкторії, визначеного методом найменших квадратів не перевищує 0,5% в порівнянні з результатами геометричного моделювання.

Для експериментальної перевірки можливості оброблення визначених діапазонів різей спроектовано різальні інструменти для оброблення різей круглого (рис. 10 а) та трикутного профілю (рис. 10 б).

На основі отриманих умов (табл. 1) розроблені конструкції непрофільних інструментів для обробки метричної, дюймової та круглої різей.

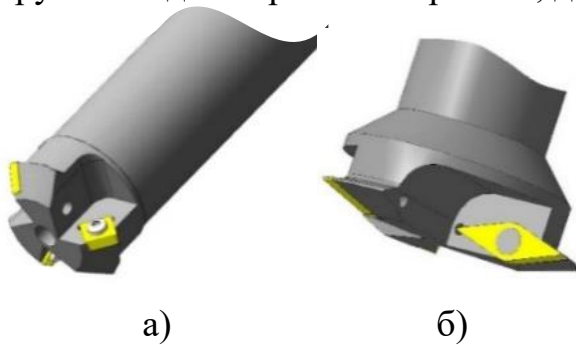


Рис. 10 – Непрофільні інструменти для обробки різей: а) круглого профілю; б) трикутного профілю

VCMT 110302 з кутом при вершині  $\varepsilon=35^\circ$ , що обумовлено необхідністю обробки різей близьких за номінальним розміром, як метричної так і дюймової одним типорозміром інструмента.

Для знаходження оптимального режиму оброблення спроектованим різальним інструментом вирішена задача лінійного програмування, що пов'язана з пошуком максимальної продуктивності за наявності технічних обмежень при забезпеченні необхідної точності та якості. В якості цільової функції прийнята максимальна

Різальні інструменти мають три змінні непереточувані пластини, що закріплені гвинтами до корпусу. Зважаючи на невеликий внутрішній діаметр оброблюваної круглої різі (28,36 мм) та необхідність розміщення якомога більшої кількості пластин на розрахунковому діаметрі інструмента, було використано різальні пластини CCMT 060204 з кутом при вершині  $\varepsilon=80^\circ$ . Для оброблення різей трикутного профілю застосовані пластини

продуктивність  $f_0$  оброблення, що досягається поєднанням максимально допустимих значень частоти обертання  $n_i$  і подачі  $s$  при заданій глибині різання та зводиться до мінімізації основного часу  $t_o$  на оброблення різі (7).

$$t_o = \frac{L \cdot i}{s \cdot n_i} = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot V \cdot s} \rightarrow \min \quad (7)$$

Сформульована система нерівностей та система рівнянь складається із цільової функції  $f_0$  та сукупності технічних обмежень ( $b_1$  – за можливостями різального інструменту,  $b_2$  – за потужністю приводу головного руху верстата,  $b_3$  – за силою, що допускається міцністю ланки механізму подачі верстата,  $b_4$  – за точністю обробки, що визначається жорсткістю технологічної системи,  $b_5$  – за шорсткістю поверхні,  $b_6, b_7$  – за гранично допустимими діапазонами подач,  $b_8, b_9$  – за гранично допустимими діапазонами частот обертання шпинделя).

В результаті лінеаризації цільової функції  $f_0$  і обмежень ( $b_1$ – $b_9$ ) (8) шляхом логарифмування і ввівши позначення  $x_1 = \ln s$ ,  $x_2 = \ln n_i$ , отримаємо систему лінійних нерівностей (9) та лінійну цільову функцію продуктивності  $f_0$ . Для оброблення круглої різі R32 непрофільним інструментом (матеріал різальних пластин – твердий сплав) в заготовці зі сталі 40X на верстаті моделі 6P13Ф3 система (9) набуває вигляду (10).

$$\begin{aligned} b_1 &= \ln \left( \frac{318 C_V \cdot K_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot D} \right) \\ b_2 &= \ln \left( \frac{1000^{0,85} \cdot N_l^{\text{CT}} \cdot 1020 \cdot 60}{10 C_{P_z} \cdot t^{1,0} \cdot (\pi \cdot D)^{0,85} \cdot K_{P_z}} \right) \\ b_3 &= \ln \left( \frac{[P_{\text{CT}}]}{9,81 \cdot 10 \cdot C_{P_z} \cdot t^{1,0} \cdot K_{P_z}} \right) \\ b_4 &= \ln \left( \frac{\sigma_u \cdot W_C \cdot 1000^{-0,15}}{10 C_{P_z} \cdot l_p \cdot t^{1,0} \cdot (\pi \cdot D)^{0,85} \cdot K_{P_z}} \right) \\ b_5 &= \ln \left( \frac{Ra \cdot (\pi \cdot D)^{0,06} \cdot r^{0,85} \cdot HB^{0,06} \cdot s^{0,58}}{0,85 \cdot 1000^{0,06} \cdot t^{1,0} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_V \cdot x_1 + x_2 \leq b_1 \\ Y_{P_z} \cdot x_1 + (n_{P_z} + 1) \cdot x_2 \leq b_2 \\ Y_{P_x} \cdot x_1 \leq b_3 \\ Y_{P_z} \cdot x_1 - n_{P_z} \cdot x_2 \leq b_4 \\ Y_{P_z} \cdot x_1 \leq b_5 \\ x_1 \geq b_6 \\ x_1 \leq b_7 \\ x_2 \geq b_8 \\ x_2 \leq b_9 \\ f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max \end{array} \right. \quad (9) \quad \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot x_1 + x_2 \leq 7,33 \quad (b_1) \\ 0,75 \cdot x_1 + 0,85 x_2 \leq 6,84 \quad (b_2) \\ 0,75 x_1 \leq -1,66 \quad (b_3) \\ 0,75 x_1 - 0,15 x_2 \leq 2,02 \quad (b_4) \\ 0,75 x_1 \leq 0,111 \quad (b_5) \\ x_1 \geq -2,99 \quad (b_6) \\ x_1 \leq 1,09 \quad (b_7) \\ x_2 \geq 3,69 \quad (b_8) \\ x_2 \leq 7,6 \quad (b_9) \\ f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max \end{array} \right. \quad (10)$$

Схема визначення оптимальних режимів різання для оброблення круглої різі графічно представлена на рис. 11. Розрахунки та побудова моделі проводились у математичному пакеті MathCAD.

На рис. 11 прямими лініями (1-1; 2-2...9-9) зображені нерівності системи (10) в подвійних логарифмічних шкалах. Стрілки на лініях вказують напрямок розміщення точок, що допустимі значеннями  $s$  та  $n_i$ . Перетин ліній утворює область можливих рішень  $ABCD$  системи (10).

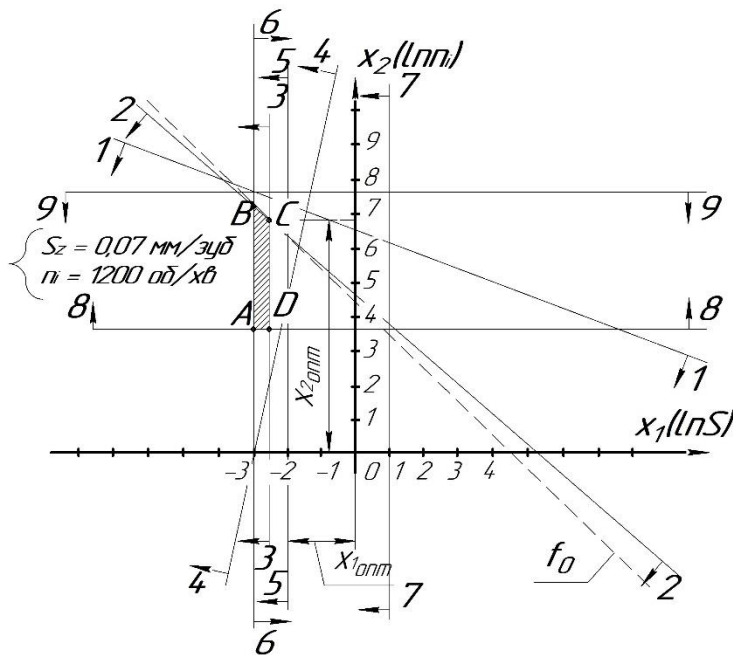


Рис. 11 – Схема визначення оптимальних режимів різання для оброблення круглої різі R32 ISO 10208 зі сталі 40X

$n_{onm} = 1200$  об/хв, подача  $S_{z_{onm}} = 0,07$  мм/зуб. Оптимальна швидкість різання при цьому становить  $V_{onm} = 113$  м/хв. Згідно паспортних даних верстата:  $s_{xв} = 262$  мм/хв,  $n_i = 1250$  об/хв,  $V = 118$  м/хв.

Аналогічна задача лінійного програмування виконана для оптимізації режимів різання при обробленні метричної і дюймової різей. Оптимальні режими різання: частота обертання  $n_{onm} = 1050$  об/хв, подача  $S_{z_{onm}} = 0,07$  мм/зуб. Оптимальна швидкість різання при цьому становить  $V_{onm} = 148$  м/хв. Згідно паспортних даних верстата:  $s_{xв} = 210$  мм/хв,  $n_i = 1000$  об/хв,  $V = 144$  м/хв.

Для перевірки забезпечення нерезонансних режимів оброблення був проведений модальний аналіз спроектованого інструменту для нарізання різей спеціального та трикутного профілю. В результаті модальний аналіз підтвердив відсутність можливості виникнення резонансних явищ.

Таким чином, результати моделювання процесу силової взаємодії непрофільного різального інструмента та заготовки, а також визначені оптимальні режими оброблення дозволяють перейти до експериментальних досліджень.

У четвертому розділі виконано моделювання процесу оброблення метричної, дюймової та круглої внутрішніх різей методом безцентроїдного огинання непрофільними інструментами в САМ-системі, а також виконані експериментальні дослідження оброблення різей на верстатах із ЧПК.

За отриманими залежностями (табл. 1) розраховані радіуси гвинтових траєкторій руху різальних інструментів та виконано віртуальний експеримент в САМ-системі Delcam PowerMill оброблення дюймової (G1½" ГОСТ 6357-81, клас точності В), метричної (M48x3-7H ГОСТ 16093-2004) та круглої (R32 ISO 10208) різей. У процесі моделювання оброблення різей задавалися наступні дані: 3D-модель спроектованого інструмента (різальні пластини подані як суцільні); кут підйому різі та радіус гвинтової траєкторії різального інструмента (рис. 12).

Граничні прямі  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DA$  перетинаючись, утворюють багатокутник, кожна з точок всередині якого задовольняє нерівності всіх граничних прямих системи (10), які беруть участь в їх утворенні.

В багатокутнику  $ABCD$  цільова функція  $f_0$  набуває максимального значення в точці  $C$ , для якої сума відстаней до осей  $(X_1 + X_2)$  максимальна. Координати точки  $C$  ( $X_{1onm}$ ,  $X_{2onm}$ ) є шуканими оптимальними значеннями параметрів, на підставі яких визначаються оптимальні подача  $s$  і частота обертання  $n_i$ .

Таким чином, для заданих умов оброблення круглої внутрішньої різі були визначені такі оптимальні режими різання: частота обертання



Моделюванням оброблення отримано профілі різей та визначені їх геометричні параметри і встановлено, що розміри отриманих профілів різей M48x3, G1½" та R32 перебувають у межах допуску на їх виготовлення згідно відповідних стандартів.

Експериментальні дослідження оброблення різей виконувались на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК моделі 6P13Ф3 (рис. 13). Заготовка встановлювалась у трикулачковому патроні, а інструмент – у оправці типу Weldon.

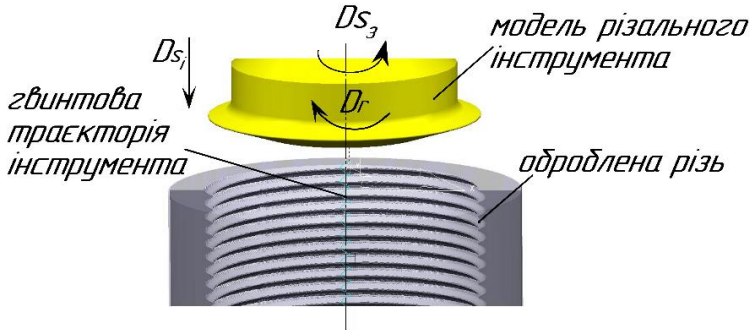


Рис. 12 – Моделювання оброблення різей у PowerMill

Оброблення круглої різі здійснювалося пластинами CCMT 060204 за один прохід на рекомендованих режимах: швидкість різання – 118 м/хв; подача на зуб – 0,07 мм/зуб. Довжина оброблюваної різі становила 65 мм. Матеріал заготовок – сталь 5ХНМ ГОСТ 5950-2000 (оброблення круглих різей R32 у корпусах бурових коронок). Також виконана

обробка метричної різі M48x3 пластинами ромбічної форми VCMТ 11 03 02 за один прохід на рекомендованих режимах: швидкість різання – 144 м/хв; подача на зуб – 0,07 мм/зуб. Довжина оброблюваної різі становила 60 мм.



Рис. 13 – Експериментальна установка для оброблення різей

Проведено контроль геометричних параметрів мікрошліфів осьових перерізів профілей внутрішніх різей (рис. 14) на інструментальному мікроскопі. Встановлено, що параметри оброблених різей (висота профілю  $H$ , кут профілю  $\alpha$ , крок  $p$ ) знаходяться у допустимих межах згідно відповідних стандартів. Виконано обробку круглих різей R32 в деталях корпусів бурових коронок, а також муфт з'єднувальних з метричними різями M48x3-7H та M48x3-LH-7H. При обробленні деталей з виробничої партії і почергового контролю їх зовнішнього та внутрішнього діаметрів (рис. 15, 16) встановлено, що нові пластини здатні обробити 30 деталей із круглою різзю R32 та 25 деталей із метричною різзю M48x3.

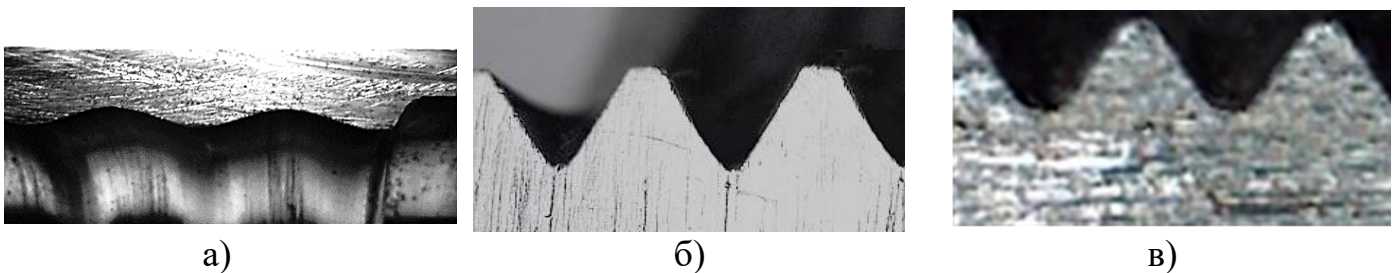


Рис. 14 – Параметри профілю різей в осьовому перерізі:  
а) круглої R32; б) метричної M48x3; в) дюймової G1½"

Результати контролю діаметральних розмірів різей (рис. 15, 16) показали, що процес оброблення деталей із застосуванням вказаних рекомендацій по технології оброблення внутрішніх різей методом безцентроїдного огинання із застосуванням непрофільного інструмента є працездатним з технологічної точки зору, адже контрольовані параметри різей знаходяться у допустимих межах.

Контроль шорсткості круглих різей R32 виконувався на профілометрі моделі 283 та дозволив встановити, що шорсткість 52 деталей з партії 60 шт. становить  $Ra\ 3,2\ \mu\text{м}$  та відповідають вимогам креслення.

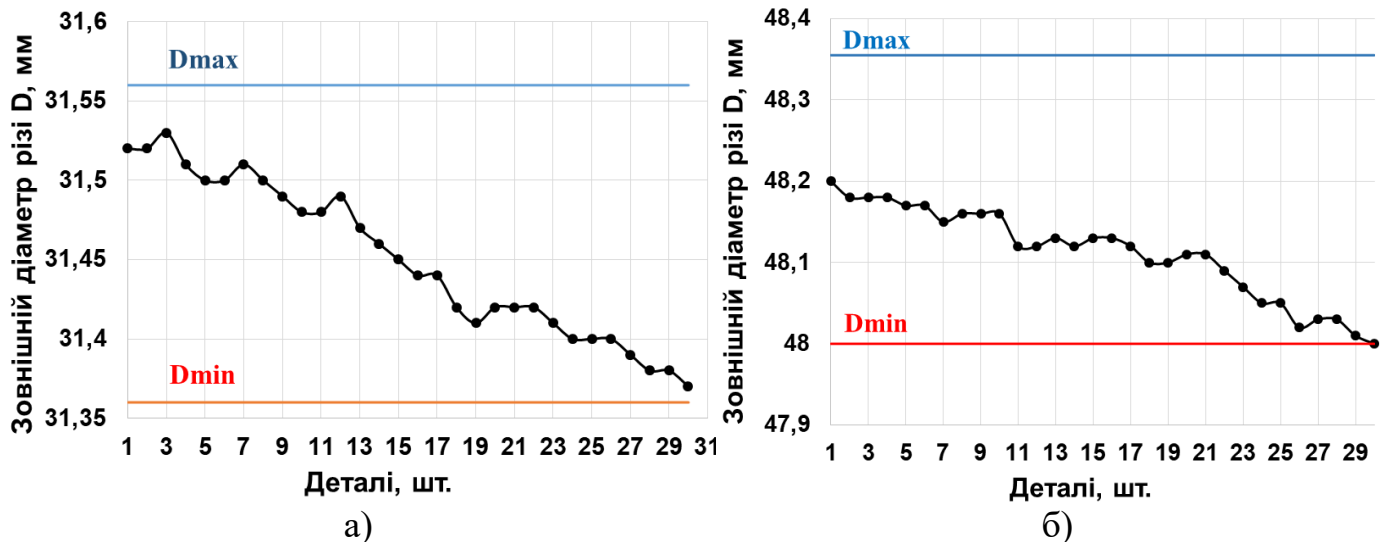


Рис. 15 – Результати контролю зовнішнього діаметра різей:  
а) круглої R32; б) метричної M48x3

Контроль розмірів даних різей мав комплексний характер та виконувався за допомогою граничних калібрів та індикаторного нутроміру НМ 18-50 ГОСТ 866 зі спеціальним різьбовим адаптером для контролю зовнішнього та внутрішнього діаметрів різей. Після оброблення пробної партії деталей виконано оброблення та контроль ще двох партій по 60 шт., та отримано аналогічну кількість придатних деталей.

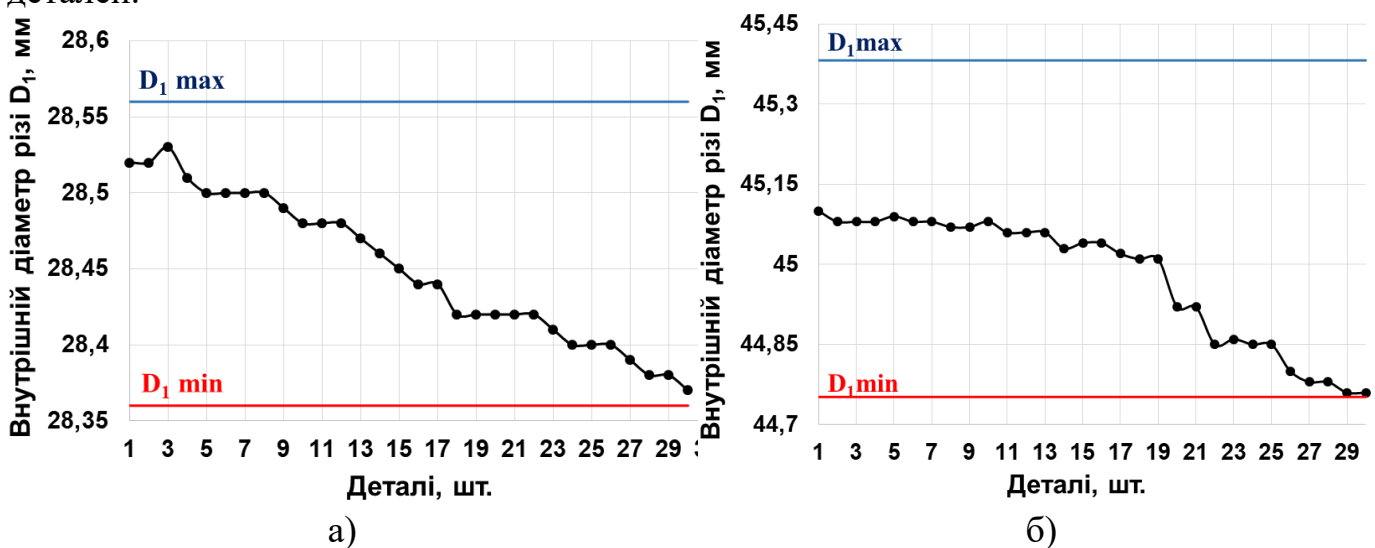


Рис. 16 – Результати контролю внутрішнього діаметра різей:  
а) круглої R32; б) метричної M48x3

Експериментально доведено, що оброблення внутрішніх різей за запропованою технологією методом безцентроїдного огинання із застосуванням непрофільного інструмента дозволяє забезпечити точність контрольованих параметрів різей та якість обробленої поверхні. Однак для підтвердження високої продуктивності оброблення необхідно виконати порівняння запропонованого способу з уже існуючими за критерієм оперативного часу.

У **п'ятому** розділі визначено ефективну область застосування технології оброблення різей методом безцентроїдного огинання непрофільним інструментом та розраховано економічний ефект від впровадження. Для порівняння за продуктивністю запропонованого способу з відомими розраховано основний час при обробленні ділянки круглої різі R32 довжиною 100 мм зі сталі 40X (рис. 17).

Порівняння за продуктивністю найбільш поширених способів оброблення круглої та метричної різей показало зменшення основного часу від 2 до 9 разів, а допоміжного – від 2 до 3 разів при обробленні із застосуванням запропонованої технології у порівнянні з відомими способами.

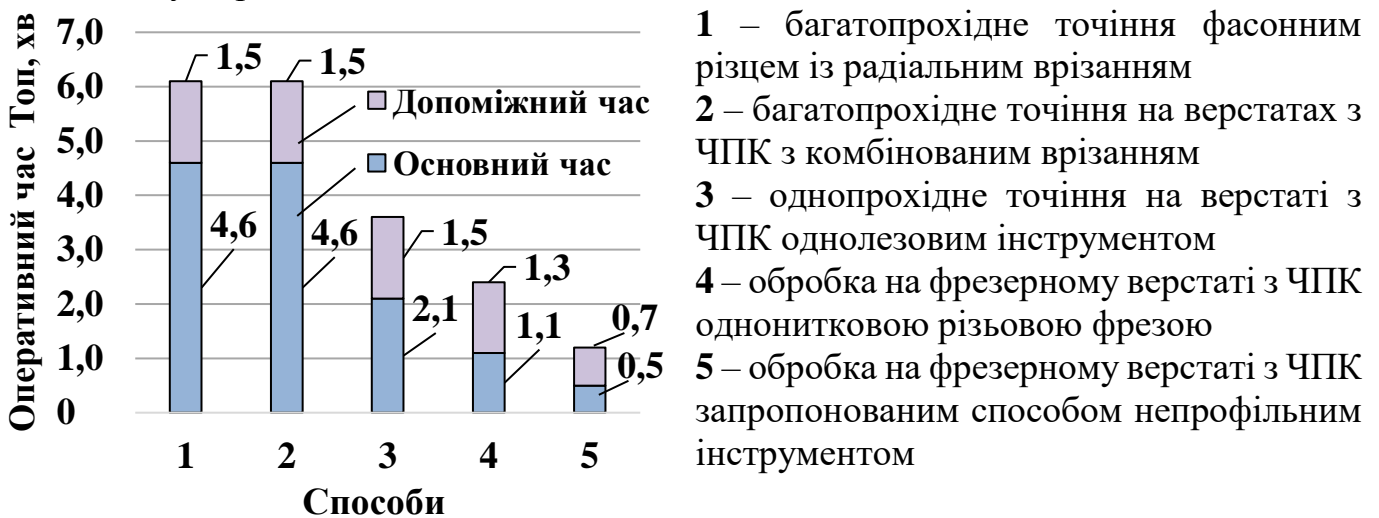


Рис. 17 – Порівняння продуктивності оброблення круглої різі R32 за оперативним часом (основним та допоміжним)

Для визначення ефективної області застосування розрахована приведена собівартість механічного оброблення різьової поверхні в залежності від обсягу партії (рис. 18). Приведена собівартість включає в себе вартість різальних пластин, корпусу різального інструмента у гривнях на оброблення різі та частку витрат на оплату праці робітників.

Виробничі випробування запропонованого способу та конструкцій непрофільних різальних інструментів були проведені на НВП «Насостехкомплект» (м. Суми). Розрахунки річного економічного ефекту показали значне скорочення витрат на різальні пластини, а також витрат на заробітну плату робітників при використанні запропонованого ТП із застосуванням способу обробки непрофільним інструментом за методом безцентроїдного огинання.

Річний ефект за укрупненими розрахунками при обробці корпусів бурових коронок склав 42260 грн., а при обробці муфт з'єднувальних – 16550 грн. при річному випуску деталей 2000 шт. кожного із найменувань деталей.

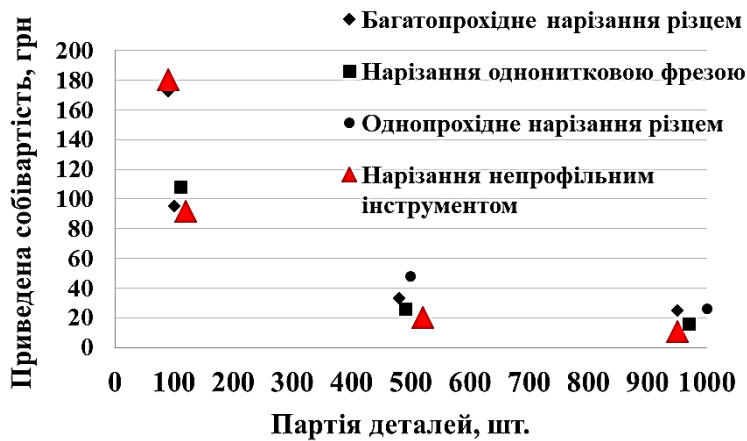


Рис. 18 – Загальні витрати на механічну обробку круглої внутрішньої різі R32 на одну деталь

При цьому собівартість однієї деталі зменшилась на 21,13 грн. та на 8,28 грн. відповідно.

У **додатках** наведено креслення деталей «Корпус бурової коронки» та «Муфта з'єднувальна», конструкторська документація на виготовлення непрофільних інструментів для круглої різі та різей трикутного профілю, а також акти впровадження у виробництво та навчальний процес.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення продуктивності оброблення внутрішніх різей спеціального профілю непрофільним різальним інструментом методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК.

1. Аналіз конструкторсько-технологічних характеристик профілів різей та технологій їх оброблення з урахуванням кінематичних можливостей фрезерних верстатів з ЧПК дозволив визначити типи різей, для яких можливе застосування технології оброблення непрофільним інструментом методом безцентроїдного огинання, а саме: однозахідні внутрішні циліндричні різі, симетричного профілю із радіусною формою западини, за формою профілю: трикутні, кругловідні та комбіновані, середньої та низької точності. Визначено місце нового способу оброблення серед альтернатив та сформульовані конструкторсько-технологічні обмеження, що забезпечують необхідну якість та точність.

2. Теоретично обґрунтований набір та зв'язок технологічних параметрів, які реалізують оброблення внутрішніх різей спеціального профілю методом безцентроїдного огинання на верстатах з ЧПК. Встановлені особливості зміни глибини різання, довжини різальної кромки та обмеження на геометрію різального інструменту з боку геометрії різі та технологічних рухів.

3. Розроблена математична модель процесу силової взаємодії в технологічній системі при обробленні методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК показала екстремальний вплив кількості різальних елементів на глибину різання (для кожного різального елемента) та сумарну результуючу силу різання, що діє на різальний інструмент. Встановлено, що мінімальні зміни глибини різання та сумарної результуючої сили різання виникають для різального інструмента з трьома різальними пластинами.

4. Визначені межі застосування технології оброблення внутрішніх різей методом огинання непрофільним інструментом: для метричної – в діапазоні кроків  $p=2\div3,5$  мм та діаметрами  $D=16\div64$  мм, трапецеїдальної  $p=2$  мм та діаметрами  $D=16\div28$  мм, дюймової – з усіма типорозмірами кроків та діаметрами G3/8÷G3" та

круглої – з кроком  $p=12,7$  мм та діаметрами  $R22\div64$  мм. Доведено, що діапазон діаметрів оброблюваних різей обмежується лише конструктивними розмірами інструмента.

5. Запропоновані залежності діаметрів непрофільного інструменту і параметрів траєкторії його руху від параметрів різі у вигляді рівнянь регресії дозволяють з достатньою точністю обирати геометричні і кінематичні характеристики інструменту. Встановлено, що для метричної, дюймової та круглої різі похибка розрахунку діаметру непрофільного інструменту та радіусу його гвинтової траєкторії, визначених методом найменших квадратів не перевищує 0,5% порівняно з результатами геометричного моделювання.

6. Встановлено та експериментально підтверджено, що запропоновані технологічні процеси, а також конструкції різальних інструментів для обробки круглої різі R32 та метричної різі M48x3-7H та M48x3-LH-7H дозволяють забезпечувати точність обробки згідно вимог відповідних стандартів. Визначено оптимальний режим різання для круглої різі R32 при обробці корпусів бурових коронок зі сталі 5XHM, а саме  $V = 118$  м/хв та  $s_{x\phi} = 250$  мм/хв та при обробці муфти з'єднувальної зі сталі 40X –  $V = 144$  м/хв та  $s_{x\phi} = 210$  мм/хв за умови наявності на інструменті трьох різальних пластин.

7. Комп'ютерне моделювання оброблення дюймової ( $G1\frac{1}{2}$ " ГОСТ 6357-81, клас точності В), метричної (M48x3-7H ГОСТ 16093-2004) та круглої (R32 ISO 10208) різей у програмному забезпеченні Delcam PowerMill. показало, що розміри отриманих профілів різей M48x3,  $G1\frac{1}{2}$ " та R32 перебувають у межах допуску на їх виготовлення згідно відповідних стандартів, тобто точність забезпечується.

8. При експериментальному обробленні круглих різей R32 в деталях з виробничої партії корпусів бурових коронок, а також муфт з'єднувальних з метричними різями M48x3-7H та M48x3-LH-7H та почерговому контролі їх зовнішнього та внутрішнього діаметрів встановлено технологічну стійкість твердосплавних пластин: 30 деталей із круглою різзю R32 та 25 деталей із метричною різзю M48x3.

9. Порівняння за продуктивністю найбільш поширених способів оброблення круглої та метричної різей показало зменшення основного часу від 2 до 9 разів, а допоміжного – від 2 до 3 разів при обробленні із застосуванням запропонованої технології у порівнянні з відомими способами.

10. Результати досліджень впроваджено у виробництво корпусів бурових коронок та муфт з'єднувальних на НПП «Насостехкомплект» (м. Суми). Виробничі випробування підтвердили ефективність запропонованих ТП, а також конструкцій непрофільних різальних інструментів. Річний ефект за укрупненими розрахунками при обробці корпусів бурових коронок склав 42260 грн., а при обробці муфт з'єднувальних – 16550 грн. при річному випуску деталей 2000 шт. кожного із найменувань деталей. При цьому собівартість однієї деталі зменшилась на 21,13 грн. та 8,28 грн. відповідно.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Нешта А.А. Способы обработки круглой резьбы / А.А. Нешта, С.С. Некрасов, Д.В. Криворучко // Оборудование и инструмент для профессионалов: Металлообработка. – 2013. – № 4. – С. 86–88. *Здобувачем систематизовано та описано розповсюджені способи оброблення круглих різей.*



2. Нешта А.А. Анализ производительности обработки винтовых поверхностей / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 2. – С. 46–49. *Здобувачем виконано аналіз продуктивності оброблення гвинтових поверхонь та різей спеціального профілю.*

3. Нешта А.А. Область применения метода обработки внутренней резьбы мерным инструментом / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Вісник НТУ ХПІ. – 2015. – № 4. – С. 145–149. *Здобувачем запропонована та описана технологія оброблення внутрішніх різей непрофільним інструментом.*

4. Нешта А.А. Особенности обработки различных типов внутренних резьб мерным инструментом / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Журнал инженерных наук. – 2016. № 2. – С. 20–24. *Здобувачем розроблені залежності діаметрів непрофільних інструментів і траєкторії їх рухів від параметрів різей.*

5. Нешта А.О. Забезпечення параметрів якості круглої внутрішньої різі при обробці високопродуктивним способом / А.О. Нешта // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. № 3 (81). (Index Copernicus) *Здобувачем виконані експериментальні дослідження з оброблення круглої, метричної та дюймової внутрішніх різей, запропонований метод компенсації розмірного зношування різальних пластин непрофільного інструмента.*

6. Пат. UA №103734. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби / Некрасов С.С., Криворучко Д.В., Нешта А.О. МПК В23С 3/32 (2006.01), В23В 1/00. – № а201214037 заявл. 10.12.2012; 11.11.2013, бюл. № 21. *Здобувачем спроектована конструкція непрофільного різального інструмента для оброблення круглої внутрішньої різі.*

7. Нешта А.А. Фрезерование круглой внутренней резьбы с большим шагом / А.А. Нешта, С.С. Некрасов // Машиностроение – основа технологического развития России ТМ-2013: Сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2013. – С. 358–359. *Здобувачем описано кінематику оброблення круглої внутрішньої різі на верстатах із ЧПК.*

8. Нешта А.А. Анализ методов формообразования различных типов резьб с крупным шагом // Сучасні технології в промисловому виробництві: матер. III Всеукр. міжвузівської наук.-техн. конф.: у двох частинах, 22-25 квітня 2015 р., Суми. – Суми: Сумський державний університет, 2014. – Ч.1 – С. 27. *Здобувачем виконано аналіз методів формоутворення різних типів різей із великим кроком.*

9. Нешта А.А. Технологическое обеспечение обработки внутренних резьб мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 24–27 квітня 2017 р., м. Чернігів. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – С. 166. *Здобувачем запропоновано номенклатуру різальних пластин для токарної обробки для метричних, дюймових та круглих різей.*

### АНОТАЦІЯ

**Нешта А.О. Технологія оброблення внутрішніх різей методом безцентроїдного огинання. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертацію присвячено розробленню технології оброблення внутрішніх різей методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК із застосуванням непрофільного інструмента.

На основі аналізу існуючих методів оброблення внутрішніх різей сформульовано робочу гіпотезу дисертаційного дослідження, що полягає в обґрунтуванні перспектив використання методу безцентроїдного огинання, як більш продуктивного способу забезпечення показників точності та якості внутрішніх різей.

На основі математичного моделювання процесу силової взаємодії обґрунтовано ефективність запропонованої конструкції різального інструмента для реалізації методу безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК. Шляхом лінійного програмування та оптимізації за критерієм максимальної продуктивності, з обмеженням по параметрам точності та якості оброблюваних різей визначено область оптимальних режимів різання. Експериментально обґрунтовано застосування технології обробки внутрішніх різей для діапазонів метричної, дюймової та круглої різей. На основі розрахунку оперативного часу встановлено, що запропонована технологія дозволяє скоротити основний час від 2 до 9 разів, а допоміжний – від 2 до 3 разів в порівнянні з існуючими технологіями обробки внутрішніх різей.

**Ключові слова:** різь, безцентроїдне огинання, непрофільний інструмент, режим різання, технологічний процес, корпус бурової коронки, математична модель, чисельне моделювання, точність, продуктивність.

### АННОТАЦИЯ

**Нешта А.А. Технология обработки внутренних резьб методом безцентроидного огибания. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке технологии обработки внутренних резьб методом безцентроидного огибания на фрезерных станках с ЧПУ с применением непрофильного инструмента. На основе анализа существующих методов обработки внутренних резьб сформулированы рабочая гипотеза диссертационного исследования, которая заключается в обосновании перспектив использования метода безцентроидного огибания, как более продуктивного способа обеспечения показателей точности и качества внутренних резьб. На основе математического моделирования процесса силового взаимодействия обоснована эффективность предложенной конструкции режущего инструмента для реализации метода безцентроидного огибания на фрезерных станках с ЧПУ.

Путем линейного программирования и оптимизации по критерию максимальной производительности, с ограничением по параметрам точности и качества, определена область оптимальных режимов резания для диапазонов метрической, дюймовой и круглой резьб. Экспериментально обосновано применение технологии обработки для диапазонов метрической, дюймовой и круглой внутренних резьб. На основе расчета оперативного времени установлено, что предложенная технология позволяет сократить основное время от 2 до 9 раз, а вспомогательного – от 2 до 3 раз в сравнении с существующими технологиям обработки внутренних резьб.

**Ключевые слова:** резьба, безцентроидное огибание, непрофильный инструмент, режим резания, технологический процесс, корпус буровой коронки, математическая модель, численное моделирование, точность, производительность.

### ABSTRACT

**Neshta A.O. Technology of machining internal threads with method of non-centroidal bending. – Manuscript.**

Thesis for scientific degree of Candidate of Engineering Science on specialty 05.02.08 – Manufacturing Engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of the technology of machining of internal threads using the method of non-centroidal bending on CNC milling machines with the use of a non-profile cutting tool. On the basis of the analysis of the advantages and disadvantages of existing methods of machining internal threads with profile cutting tool or comb tool cutters, and multi-pass turning with a non-core cutting tool, the working hypothesis of the dissertation research was formulated. It consisted in justification of the prospects of using the method of non-centroidal bending as a more productive technology of ensuring the accuracy and quality parameters of internal thread. It was justified the area of application of machining method of non-centroidal with a non-core cutting tool for the metric thread- in the range of thread steps from 2 to 3,5 mm and diameters from 16 to 64 mm, trapezoidal threads with thread step - 2 mm and diameters from 16 to 28 mm, inch thread - with all standard sizes of steps and diameters from G3/8 to G3 " and rope thread with a thread step – 12,7 mm and diameters from R22 to 64 mm.

In present research by means of calculating the parameters of the spiral trajectory, the kinematic scheme of combining the rotation of the cutting tool, the movement of the axial feed of the cutting tool, the movement of the circular supply of the workpiece around the axis of the cutting tool, and the number of cutting inserts it was theoretically justified condition of bending of cutting inserts for a new method for machining internal threads. Based on mathematical modeling of force interaction, the efficiency of the proposed design of a cutting tool for the implementation of the method of non-centroidal bending on CNC milling machines was justified. As a result of modal analysis of designed cutting tool for machining of rope, metric and inch threads it was determined proved no resonance when using the developed tool. The value of the first internal frequency of a non-core tool for machining rope thread was 2213 Hz, which didn't coincide with the natural frequency of machining, which was 63 Hz, at spindle speed  $n_i = 1250$  rpm for cutting tool with three cutting inserts. The first internal frequency of a non-core cutting tool for machining metric



and inch thread was 1537 Hz, which also did not coincide with the natural frequency of the cutting tool during machining – 50 Hz, which corresponds to the spindle speed  $n_i = 1000$  rpm for cutting tool with three cutting inserts.

By means of linear programming and optimization based on the criterion of maximum productivity, with the limitation on the parameters of accuracy and quality of internal thread, the area of optimal cutting parameters was determined. It was established and experimentally confirmed that the proposed manufacturing technology, as well as the design of cutting tools for circular R32 and metric cut M48x3-7N and M48x3-LH-7N, allowed to ensure the accuracy of machining in accordance with the requirements of the relevant standards. The optimal cutting parameters for rope thread R32 was determined for machining of stainless steel 5XHM (1.2711, 1.2713, 55NiCrMoV5 in DIN classification): cutting speed – 118 m/min and FPM – mm/min, and for machining steel 40X (1.7045, 37Cr4 in DIN classification) cutting speed – 144 m/min, and FRM – 210 mm/min. On the basis of calculation of operating time according to the criteria of the direct manufacture time and auxiliary time it was determined that the proposed technological process allowed to reduce direct manufacture time from 2 to 9 times, and the auxiliary time - from 2 to 3 times in comparison with the existing technological process of machining of internal threads.

Implementation of the results of the dissertation research into manufacturing allowed to receive an economic effect, according to the enlarged calculations, for machining bit blank in the amount of 42260 UAH., and when machining double socket – 16550 UAH., with annual output 2000 pcs. of each item. That allowed to reduce the cost of one part by 21,13 UAH. and 8,28 UAH respectively.

**Key words:** thread, a non-centroidal bending, a non-profile cutting tool, cutting parameters, a technological process, bit blank, a mathematical model, numerical modeling, accuracy, productivity.



Підписано до друку . . 2019 р. Формат 60х84/16.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Ум. друк. арк 1,1. Тираж 100 пр. Замовлення №

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 3062 від 17.12.2007 р.